

5. Scuderi L. F. Expressions for predicting 3-D shock wave-turbulent boundary layer interaction pressures and heating rates. AIAA Paper, 1978, N 162. Рус. пер. Экспресс-информация, Авиастроение, 1979, № 21.
6. Oskam B., Vas I. E., Bogdonoff S. M. Mach 3 oblique shock wave-turbulent boundary layer interactions in three dimensions. AIAA Paper, 1976, N 336.
7. Зубин М. А., Остапенко Н. А. Экспериментальное исследование структуры трехмерных сверхзвуковых течений с отрывом пограничного слоя в углах.— В сб.: Струйные и отрывные течения. М.: Изд-во МГУ, 1979.
8. Зубин М. А., Остапенко Н. А. Структура течения в отрывной области при взаимодействии прямого скачка уплотнения с пограничным слоем в угле.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 3.
9. Желтоводов А. А. Трехмерное взаимодействие скачка уплотнения, генерируемого клинообразным препятствием, с турбулентным пограничным слоем.— В сб.: Аэрофизические исследования. Новосибирск: изд. ИТПМ СО АН СССР, 1976, вып. 6.
10. Neumann R. D., Token K. H. Prediction of surface phenomena induced by three dimensional interactions on planar turbulent boundary layers. XXV th Congress, Amsterdam, 1974, Pap. N. 74—058.
11. Глаголев А. И., Панов Ю. А. Исследование истечения встречных пристеночных струй в сверхзвуковой поток из препятствий на поверхности пластины.— В сб.: Струйные и отрывные течения. М.: Изд-во МГУ, 1979.
12. Поляков Н. Ф. Ламинарный пограничный слой в условиях «естественного» перехода к турбулентному течению.— В сб.: Развитие возмущений в пограничном слое. Новосибирск: изд. ИТПМ СО АН СССР, 1979.
13. Харитонов А. М. Влияние возмущений потока на переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный.— В сб.: Аэромеханика. М.: Наука, 1976.
14. Гапонов С. А., Маслов А. А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980.
15. Демьяненко В. С. Экспериментальное исследование пространственных сверхзвуковых течений газа в области интерференции пересекающихся поверхностей. Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1973.
16. Christophel R. G., Rockwell W. A., Neumann R. D. Tabulated Mach-6 3-D shock wave-turbulent boundary layer interaction heat transfer data. AFFDL-TM-74-212-FXG Supplement, Air Force Flight Dynamics Laboratory, February, 1975.

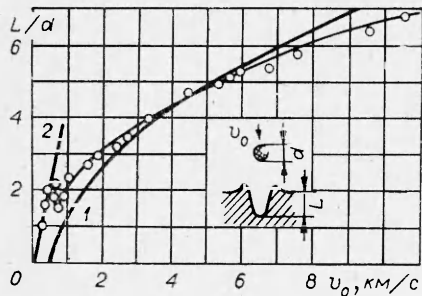
УДК 539.1 : 531.66

ОБРАЗОВАНИЕ КРАТЕРОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

В. В. Кузнецов
(Новосибирск)

При исследовании зависимости отношения глубины пробития L к диаметру частицы ударника d от скорости удара v_0 в определенном диапазоне скоростей был экспериментально обнаружен характерный участок немонотонности (см. фигуру) [1]. Этот эффект наблюдался в экспериментах по удару стального шара по преграде из свинца (характерные скорости $v_0 \simeq 0,7$ км/с) и пенопласта (скорость $v_0 \simeq 7-10$ км/с). Аналогичная немонотонность наблюдалась в [2]. Объяснения замеченного эффекта, насколько известно, пока нет.

В [3] показано, что метеорит, внедряясь в Землю с космической скоростью, испаряется, причем полное испарение металла достигается при плотностях тепловой энергии порядка $2U$, где U — энтальпия парообразования. При наличии свободной поверхности заметное испарение может происходить при плотностях энергии порядка $0,5U$ [4]. Скорость волны испарения при этом составляет примерно 100—200 м/с. Оценим характер зависимости L/d от v_0 , считая приближенно, что вся кинетическая энергия ударника идет на испарение ударника и преграды. Тогда из-за испарения должен образоваться кратер в форме полусферы с радиусом, равным глубине пробития L . Объем кратера $V \simeq 2L^3 = W/U\rho_{\text{п}}$ ($\rho_{\text{п}}$ — плотность материала преграды). Так как $W = mv_0^2/2 \simeq d^3\rho_{\text{у}}v_0^2/4$, то



$L/d = \sqrt[3]{\rho_y v_0^2 / (8\rho_n U)} = kv_0^{2/3}$ для $v_0^2 > U$ (ρ_y — плотность материала ударника). Рассчитанная зависимость L/d от v_0 для соударения стального шара со свинцовой преградой изображена на фигуре (кривая 1), здесь же приведены экспериментальные точки [1]. В области малых скоростей $v_0 \approx 0-2$ км/с имеется значительное расхождение кривой 1 и экспериментальных точек. Оно

вызвано следующими обстоятельствами. Когда кинетическая энергия меньше энтальпии $W < Um$ (m — масса ударника), испарения не происходит и глубина пробития L определяется пластической деформацией материала преграды. Она линейно связана со скоростью v_0 [5]:

$$L = v_0 t - \frac{1}{m} \int_0^t dt \int_0^t F dt - \frac{1}{\rho A c_0} \int_0^t F dt,$$

где F — сила; ρ — массовая плотность; A — площадь поперечного сечения; c_0 — волновая скорость ($c_0 = \sqrt{E/\rho}$, E — модуль Юнга). На фигуре эта область L/d обозначена прямой 2. Переход между прямой 2 и кривой 1 сопровождается изменением формы кратера. Если в области малых скоростей v_0 форма кратера представляет собой усеченный конус, то в области больших скоростей ($v_0 > 2$ км/с) форма кратера представляет собой полусферу [2]. Это явление может служить причиной немонотонности зависимости L/d от v_0 . При этом отношение объема кратера к массе ударника как функция от квадрата скорости v_0^2 представляет собой линейную зависимость [2].

Аналогичное явление (уменьшение величины L/d от скорости v_0) обнаружено и при ударе стального шара по пенопласту, причем диапазон скоростей v_0 в этом случае примерно в 10 раз выше, чем при ударе по свинцовой преграде. Так как энергия диссоциации пенопласта того же порядка, что и энтальпия парообразования свинца (40—50 ккал/моль = 0,8 кДж/г для Pb), плотность пенопласта на 2 порядка ниже, чем плотность свинца, то L/d для пенопласта выше чем для свинца, примерно в $\sqrt[3]{10^4} \approx 20$ раз, что и наблюдалось в эксперименте [1].

Поступила 9 IV 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973.
2. Эйчельбергер Р., Кайнике Дж. Высокоскоростной удар. — В сб.: Физика быстротекающих процессов. Т. 2. М.: Мир, 1971.
3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
4. Беннет Ф. Волна испарения. — В сб.: Физика высоких плотностей энергии. М.: Мир, 1974.
5. Гольдсмит В. Удар и контактные явления при средних скоростях. — В сб.: Физика быстротекающих процессов. Т. 2. М.: Мир, 1971.